

GUÍA DE APRENDIZAJE



Ingeniería de Confiabilidad.



Índice

1. Introducción.	4
1.1	Introducción a la Ingeniería de Confiabilidad.
1.2	Definición de la Ingeniería de Confiabilidad.
1.3	Falla.
1.4	Confiabilidad.
1.5	Disponibilidad.
1.6	Distribución de probabilidad.
1.7	Distribuciones No Paramétricas.
1.8	Distribuciones Paramétricas.
1.9	Incertidumbre.
1.1.1	Incertidumbre aleatoria.
1.1.2	Incertidumbre fundamental.
1.1.3	Intervalo P-f.
1.1.4	Probabilidad de falla $F(t)$.
1.1.5	Riesgo.
1.1.6	Tiempo para la falla.
1.1.7	Tiempo Promedio para Fallar (TPPF).
1.1.8	Tiempo promedio para Reparar.
1.1.9	Tiempo Promedio Entre Fallas.
1.2.0	Uptime
1.2.1	Variable Aleatoria o Random
2. Desarrollo de Ingeniería de confiabilidad.	15
2.1	Diagnostico.
2.2	Confiabilidad.
2.3	Análisis de Confiabilidad Basado en el Deterioro o Física de la falla.
2.4	Mantenibilidad.
2.5	Disponibilidad.
2.6	Tiempos.
2.7	Tiempo Promedio Entre Eventos de Paro y Tasa de Interrupciones.
2.8	Estudio de los down-time.
3. Confiabilidad en activos no reparables.	27
3.1	Velocidad de incremento del peligro o tasa de fallas.
3.2	La Función Confiabilidad.
3.3	Reparable contra no reparable.

4. Pronostico en activos reparables.	34
4.1 Variables probabilísticas de interés en el Análisis de Confiabilidad de activos reparables.	
5. Confiabilidad basada en datos genéricos.	36
5.1 Evidencia.	
5.2 Opinión de Expertos.	
5.3 Bases de Datos Genéricas.	
5.4 Teorema de Bayes.	
6. Confiabilidad basada en la física del deterioro.	42
6.1 Descripción del análisis Carga-Resistencia.	



1. Introducción

1.1 Introducción a la Ingeniería de Confiabilidad.

Bienvenido, a continuación conocerás la Ingeniería de Confiabilidad.

Al final del curso podrás:

- Definir y clasificar sus diferentes variantes.
- Manipular las situaciones de riesgo presentadas en los equipos de mantenimiento e investigar en momentos críticos las fallas que registren.
- Comprender las formas de modelar las fallas de equipos.
- Realizar un diagnóstico integrado de los equipos con base en el comportamiento de fallas.
- Aplicar distintos modelos para representar el fenómeno de falla y modelar el comportamiento esperado de los equipos.
- Tomar decisiones con escasa información de estadística de fallas de equipos, con niveles tolerables de riesgo.
- Analizar la conducta de los modelos de falla para establecer acciones técnicamente factibles, rentables y viables en el presupuesto para mejorar el comportamiento de los equipos.

1.2 Definición de la Ingeniería de Confiabilidad

La ingeniería de confiabilidad puede definirse como la rama de la ingeniería que estudia las características físicas y aleatorias del fenómeno conocido como falla.

Las discusiones relacionadas con el concepto de falla suelen ser discretas, pues es extremadamente difícil conseguir un concepto que satisfaga todos los criterios o puntos de vista que pueden existir.

Se propone un concepto con amplitud suficiente, que no genere complicaciones y facilite las estimaciones de confiabilidad y riesgo.

1.3 Falla

Es el efecto que se origina cuando un componente, equipo, sistema o proceso deja de cumplir con la función que se espera que realice.

1.4 Confiabilidad

Es la probabilidad de funcionamiento libre de fallas de un equipo o sus componentes por un tiempo definido bajo un contexto operacional determinado.

1.5 Disponibilidad

Una medida del grado por el cual un ítem está en un estado operable y confiable en el inicio de una función, cuando la función es solicitada en cualquier momento (aleatorio).

1.6 Distribución de Probabilidad

Son modelos gráficos que relacionan los probables valores que pueden tomar una variable aleatoria, con la frecuencia de ocurrencia de cada uno de ellos.

Las Distribuciones de Probabilidad se clasifican en dos familias:

- Distribuciones Paramétricas.
- Distribuciones No Paramétricas.

1.7 Distribuciones No Paramétricas

Es un tipo de grafico que agrupa un conjunto de datos de una variable aleatoria, de modo que puedan apreciarse los aspectos siguientes:

- La forma en que están distribuidos los datos.
- El grado de dispersión.
- Y los valores con mayor probabilidad de ocurrencia.

1.8 Distribuciones Paramétricas

Es una función matemática teórica, que describe la forma como se espera que varíen los probables valores de una variable aleatoria.

También relaciona los diversos probables valores que puede tomar una variable aleatoria con la probabilidad de ocurrencia de cada uno.

1.9 Incertidumbre

Es el grado de separación entre nuestro nivel de conocimiento del proceso y el estado de certidumbre total.

1.1.1 Incertidumbre aleatoria

Es la incertidumbre relacionada con la heterogeneidad de la variedad o el proceso de análisis. Este tipo de incertidumbre no es reducible con más conocimiento.

1.1.2 Incertidumbre fundamental

Es la incertidumbre relacionada con el nivel de conocimiento que se tiene del proceso. Ésta se puede reducir si se adquiere más y mejor conocimiento.

1.1.3 Intervalo P-f

Tiempo transcurrido de una falla potencial hasta convertirse en falla funcional.

1.1.4 Probabilidad de falla $F(t)$

Es la posibilidad de que un componente, un sistema o un proceso fallen o dejen de realizar la función requerida en un tiempo determinado.

1.1.5 Riesgo

El riesgo es un término de naturaleza probabilística, definido como “egresos o pérdidas probables, producto de la probabilidad de ocurrencia de un evento no deseado o falla”. En este simple pero poderoso concepto coexiste la posibilidad de que un evento se haga realidad, con las consecuencias asociadas de que ocurra.

1.1.6 Tiempo para la falla

Es el periodo que transcurre desde el instante en que el componente, el equipo o el sistema inicia su operación hasta que deja de operar. El tiempo para la falla es una variable aleatoria.

1.1.7 Tiempo Promedio para Fallar (TPPF)

Es el parámetro que define el tiempo de falla esperado de una componente, un modulo o un sistema en general.

1.1.8 Tiempo promedio para Reparar

Este parámetro al igual que el Tiempo Promedio para Fallar (TPPF) es el correspondiente al Tiempo de Reparación esperado para un componente o un equipo.

1.1.9 Tiempo Promedio Entre Fallas

Se refiere al tiempo promedio de falla y la subsiguiente reparación del componente o equipo. Viene dado por la expresión:

$$\text{TPEF} = \text{TPPF} + \text{TPPR}$$

El TPEF comprende el mismo promedio de falla del componente (TPPF), así como el tiempo promedio de reparación de dicho componente una vez que ha fallado (TPPR).

El parámetro TPEF es aplicable únicamente a equipos reparables, mientras que el parámetro TPPF es aplicable a equipos reparables y no reparables, estas implicaciones como se vera en secciones siguientes tiene una marcada influencia en el modelaje de equipos.

1.2.0 Uptime

Es el tiempo equivalente entre la capacidad de diseño y la máxima capacidad demostrada en la cual un equipo opera de manera segura y en rangos de calidad.

1.2.1 Variable Aleatoria o Random

Se denomina variable aleatoria o distribuida en una variable x , que por sus características puede tomar un conjunto de valores ($x_1, x_2, x_3, x_4, \dots$ etc.), cada uno de los cuales tiene una probabilidad p de ocurrencia ($p_1, p_2, p_3, p_4, \dots p_{n-1}$), sin que se pueda asegurar específicamente qué valor tomará dicha variable.

A continuación se definen tres opciones para categorizar la falla de una bomba en una planta de proceso:

- Una bomba debe funcionar con una eficiencia de 85% para garantizar la rentabilidad del proceso. Al verificarla se calcula que su eficiencia es de 80%. La bomba se encuentra en estado de falla.
- Si una bomba sobrepasa el nivel máximo de vibraciones permisible, se encuentra en estado de falla.
- Si “no flujo” es el criterio de falla, la bomba está en estado de falla si no bombea producto.

La consistencia en el manejo del concepto de falla es importante para las estimaciones de confiabilidad y de riesgo, así como para la gerencia del negocio.

La **Tasa de Falla** (Failure Rate) se define como el número de fallas por unidad de tiempo y se expresa en unidades de falla por millón de horas.

El **Tiempo Promedio a Falla (TPPF)**: Matemáticamente, este parámetro define el tiempo de falla esperado para un componente, módulo o sistema en general. Además, está el riesgo representado por la expresión universal:

$$R(t) = p(t) \times c(t)$$

Donde:

R(t): Riesgo

p(t): Probabilidad

c(t): Consecuencias

El análisis de esta ecuación permite entender el poder de esta figura de mérito o indicador para el diagnóstico de sustituciones y la toma de decisiones.

Este indicador permite comparar situaciones y escenarios que resultarían disímiles bajo una perspectiva cotidiana, pero bajo ciertas circunstancias debe evaluarse y considerarlas en un proceso de toma de decisiones.

Podría utilizarse para discernir entre una acción de mantenimiento a equipos rotativos, caracterizados por presentar una alta frecuencia de falla con consecuencias bajas y moderadas, en contraposición con equipos estáticos con baja frecuencia de fallas pero con consecuencias tradicionalmente altas.

El riesgo se comporta como una balanza que permite ponderar la influencia de varias alternativas en términos de su impacto y probabilidad, orientando al analista en el proceso de toma de decisión.

Dependiendo de la situación o escenario estudiado, la expresión de naturaleza universal puede asumir diferentes “concepciones”:

- Cuando el desempeño de un proceso depende de la operación de equipos y sistemas físicos, el riesgo puede definirse como:

$$\begin{aligned}\text{Riesgo}(t) &= \text{Probabilidad de Falla}(t) \times \text{Consecuencias} \\ \text{Riesgo}(t) &= [1 - \text{Confiabilidad } C(t)] \times \text{Consecuencias}\end{aligned}$$

- En procesos cuyo desempeño puede ser seriamente afectado por la ocurrencia de eventos indeseados, el riesgo puede definirse así:

$$\text{Riesgo}(t) = \text{Probabilidad de ocurrencia Evento } E_i(t) \times \text{Consecuencias}$$

- En procesos de toma de decisiones, donde el beneficio a obtener depende en grado sumo de la veracidad del análisis y de la data evaluada, el riesgo puede definirse como:

$$\text{Riesgo}(t) = \text{Probabilidad de desacierto } D_i(t) \times \text{Consecuencias}$$

Es de suma importancia destacar que, en su forma general, la Ingeniería de confiabilidad puede definirse como la rama de la Ingeniería que estudia las características físicas y aleatorias del fenómeno “falla”.

Dentro del área de la Ingeniería de Confiabilidad, coexisten dos escuelas con enfoques específicos:

- Confiabilidad basada en el análisis probabilístico del tiempo para la falla o historial de fallas (*Statistical Based reliability Analysis*).
- Confiabilidad basada en el análisis probabilístico del deterioro o física de la falla (*Physics Based Reliability Analysis*).

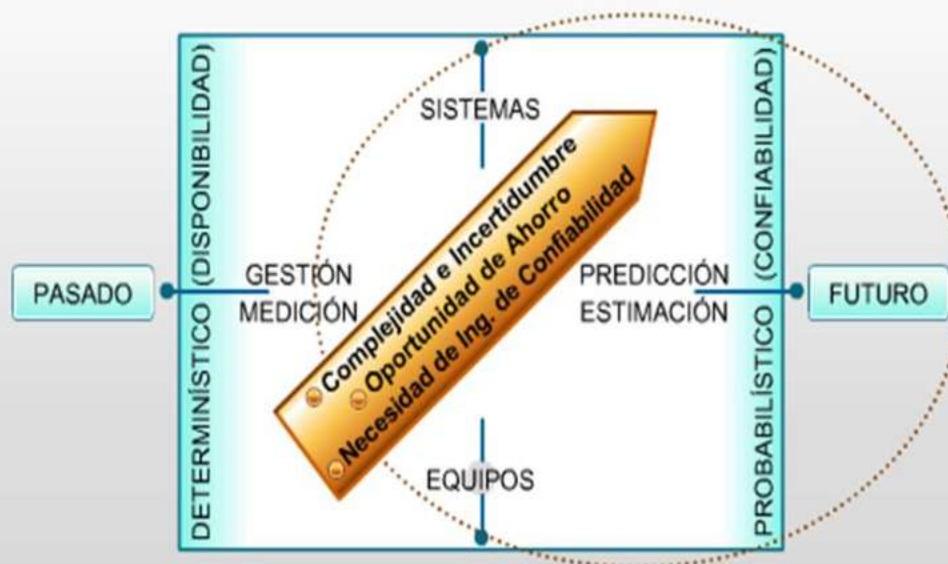
Ambas escuela tienen un objetivo común: **“Caracterizar probabilísticamente la falla para hacer pronósticos y establecer acciones proactivas dirigidas a evitalar o mitigar su efecto”**

Las dos proponen el termino probabilístico confiabilidad como indicador básico para lograr esta caracterización.

Otro punto de coincidencia es el reconocimiento de la “aleatoriedad o incertidumbre” de las variables analizadas y su tratamiento probabilístico.

Las diferencias entre estas escuelas se relacionan con la forma de analizar la falla: la primera propone predecirla estudiando la frecuencia histórica de ocurrencia o tasa de fallas, mientras que la segunda considera que una falla es la última fase de un proceso de deterioro y se concentra en predecirla a través del entendimiento de “como ocurre la falla”, es decir, estudiando la “física del proceso de deterioro.

Ingeniería de Confiabilidad

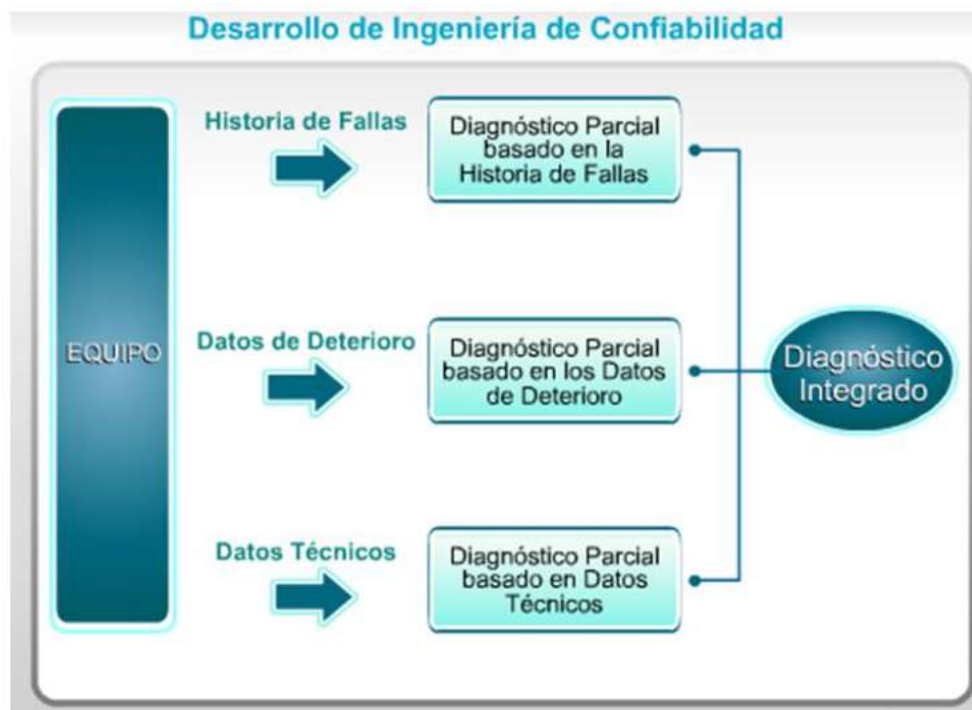


2. Desarrollo de ingeniería de confiabilidad

2.1 Diagnostico

El diagnostico es un proceso que permite caracterizar el estado actual de los equipos, los sistemas o los procesos y predecir su comportamiento futuro, por medio del análisis integrado del historial de fallas, los datos del deterioro y los datos técnicos.

Su fin es identificar las acciones correctivas y proactivas que puedan mejorar los costos y reducir el impacto en el negocio medular.



2.2 Confiabilidad

En la Confiabilidad Basada en la Historia de Fallas o Confiabilidad Basada en la Estadística del Tiempo de Falla es la rama de la confiabilidad que estudia la variable aleatoria “tiempo para la falla”.

El insumo básico para este tipo de análisis son bases de datos donde se almacenan las historias de fallas de equipos (tiempo de fallas y tiempos de reparación).

2.3 Análisis de Confiabilidad Basado en el Deterioro o física de la Falla (Physics Based Reliability Analysis)

Es la rama de la confiabilidad que considera que una falla es última fase de un proceso de deterioro y se concentra y se concentra en tratar de entender como ocurre la falla, dicha de otro modo, estudia la “física del proceso de deterioro”.

La **confiabilidad** es la probabilidad de que un componente, equipo o sistema opere sin fallar, en un periodo específico o tiempo misión. Como valor probabilístico, la confiabilidad varía desde un valor del 1 o 100%, al iniciar la operación, y disminuye hasta tomar un valor de 0 al ocurrir la falla. Esto explica que la confiabilidad varía de 100% a 0 entre una falla y otra.

La confiabilidad, en su forma simple, se describe con esta ecuación:

$$C(t) = e^{-\lambda \cdot t} = e^{-\frac{1}{TPPF} \cdot t}$$

Donde:

t = Tiempo de la misión (horas, días, semanas, meses, años etc.)

λ = Tasa de falla.

$TPPF = 1/\lambda$ = Es el tiempo promedio para fallar o tiempo promedio entre fallas.

Nótese que la confiabilidad debe tener una dimensión de tiempo misión para calcular los resultados. **Esta ecuación es válida para tiempos para la falla que sigan la distribución exponencial.**

2.4 Mantenibilidad

La Mantenibilidad trata sobre la duración de paros por fallas y paros por mantenimiento o cuánto tiempo toma (facilidad y velocidad) restituir el estado del equipo a su condición operativa después de una parada por falla o para realizar una actividad planificada.

Las características de Mantenibilidad suelen estar determinadas por el diseño del equipo, el cual especifica los procedimientos de mantenimiento y determina la duración de tiempos de la reparación.

La figura clave de mérito para la Mantenibilidad suele ser el tiempo promedio para reparar (TPPR). Cualitativamente se refiere a la facilidad con que el equipo se restaura a un estado funcionando.

Cuantitativamente se define como la probabilidad de restaurar la condición operativa del equipo o tiempo misión.

Se expresa a menudo como:

$$M(t) = e^{-\mu \cdot t} = e^{-\frac{1}{TPPR} \cdot t}$$

Donde μ = Tasa de reparación.

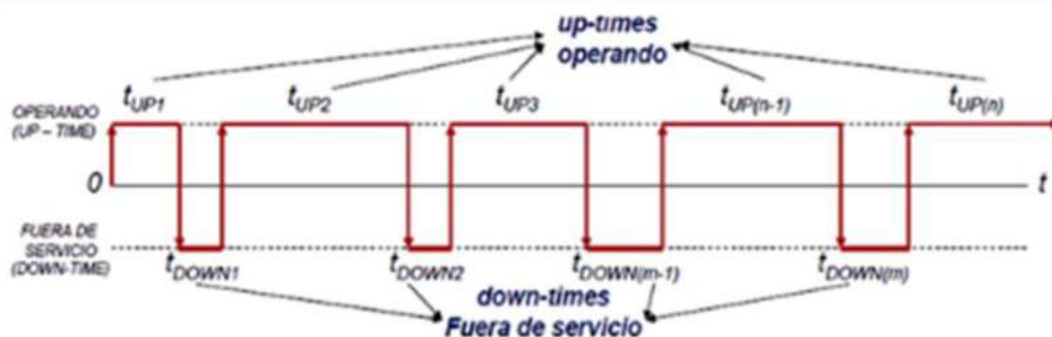
Esta ecuación es válida para tiempos para reparar que sigan la distribución exponencial.

2.5 Disponibilidad

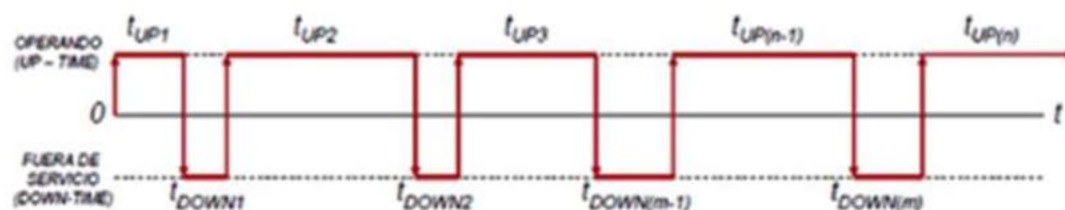
La disponibilidad es una figura de mérito o indicador que permite el porcentaje de tiempo total posible de un equipo para cumplir su función.

La disponibilidad de un elemento, un equipo o componente no implica necesariamente que esté funcionando, sino que se encuentre en condiciones de funcionar. La disponibilidad es un término probabilístico exclusivo de los “equipos reparables”.

Para estimar la disponibilidad se requieren analizar estadísticamente los tiempos operando o uptimes y los fuera de servicio o down-times.



Disponibilidad : $D(t)$



En su aceptación mas simple; disponibilidad puede definirse de la siguiente manera:

$$Disponibilidad = D = \frac{Uptime}{Uptime + Downtime} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{UPI}}{\sum_{i=1}^n t_{UPI} + \sum_{j=1}^m t_{DOWNj}}$$

Disponibilidad Inherente: Es la proporción del tiempo en que un equipo está en condiciones de operar en un periodo determinado, tomando en cuenta solo los paros no programados.

Disponibilidad Operacional: Es la proporción del tiempo en el que un equipo está en condiciones de operar en un periodo determinado, tomando en cuenta la totalidad de los paros (programados y no programados).

Disponibilidad no es lo mismo que confiabilidad.

- La **disponibilidad** nos habla de cómo usamos el tiempo global. Es decir, cuanto de ese tiempo perdemos (down-time) y cuanto aprovechamos (up-time).
- La **confiabilidad** nos ofrece información sobre el intervalo de tiempo libre de fallas o tiempo entre fallas consecutivas. Nos habla sobre la probabilidad de fallar en cada instante de este intervalo libre de fallas.
- Ambas se expresan en términos porcentuales (%) o en términos probabilísticos (entre 0 y 1).
- En la **disponibilidad** se refleja el efecto combinado de la confiabilidad y la mantenibilidad.

2.6 Tiempos

Tiempo Operativo entre Fallas (TEF): Tiempo que transcurre el equipo operando entre dos fallas sucesivas.

Tiempo de Operaciones hasta Mantenimiento Planificado (TPM): Tiempo que transcurre desde el arranque hasta que el equipo se detiene para ejecutarle algún mantenimiento planificado.

Tiempo Censado (TC): Tiempo en operación desde la última falla.

$$Uptime = \sum_{i=1}^n TEF_i + \sum_{j=1}^m TPM_j + \sum_{k=1}^w TC_k$$

n = # de valores del TEF de la muestra

m = # de valores del TPM de la muestra

w = # de valores del TC de la muestra

Tipos de Up-Time



2.7 Tiempo Promedio Entre Eventos de Paro (TPEEP) y Tasa de Interrupciones.

El TPEEP es el promedio de los tiempos entre interrupciones de diversa índole.



$$TPEEP = \frac{\sum_{i=1}^n TEF_i + \sum_{j=1}^m TPM_j + \sum_{k=1}^w TC_k}{n + m}$$

La Tasa de Interrupciones es un indicador de la frecuencia con la que el equipo o sistema bajo análisis sale de servicio por razones de diversa índole.

$$\lambda_i = \frac{n + m}{\sum_{i=1}^n TEF_i + \sum_{j=1}^m TPM_j + \sum_{k=1}^w TC_k}$$

n = # de valores del TEF de la muestra

m = # de valores del TPM de la muestra

w = # de valores del TC de la muestra



Cuando los eventos que ocasionan paros son meras fallas cuando no se toman en cuenta las paradas para mantenimientos planificados, al Tiempo Promedio Entre Eventos de Paro (TPEEP) se llama Tiempo Promedio Para Fallar (TPPF).

De igual manera, la Tasa de Interrupciones λ_i toma nombre de λ .

$$TPPF = \frac{\sum_{i=1}^n TEF_i + \sum_{k=1}^w TC_k}{n}$$

TEFi: Tiempo que transcurre el equipo operando entre falla (i-1) y la falla (i).

TCk: Tiempo de operación desde la última falla.

N: numero de valores del TEF de la muestra.

De igual manera la tasa de Interrupciones λ_i toma el nombre de λ .

$$\lambda = \frac{n}{\sum_{i=1}^n TEF_i + \sum_{k=1}^w TC_k}$$

TEFi: Tiempo que transcurre el equipo operando entre la falla (i-1) y la falla (1)

TCk: Tiempo de operación desde la última falla

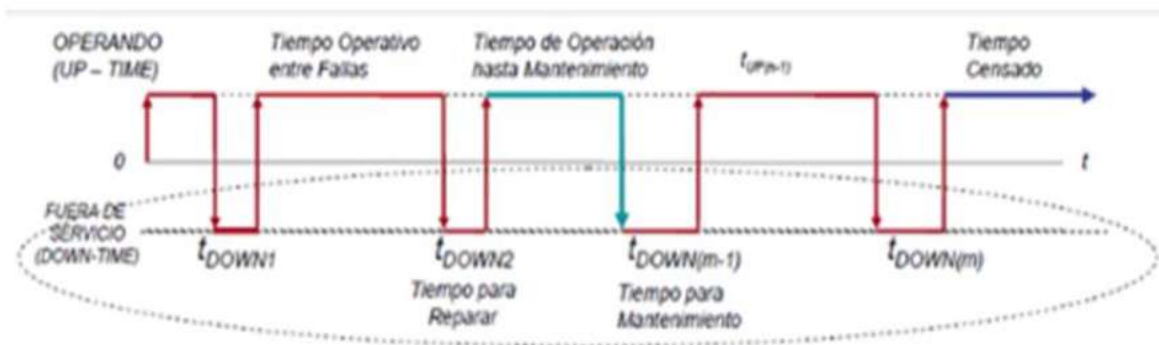
n: número de valores del TEF de la muestra

w: número de valores del TC de la muestra

2.8 Estudio de los down-time.

Tiempo para Mantenimiento (TM): Tiempo que transcurre desde el momento de la falla hasta que el equipo es desactivado para hacerle mantenimiento hasta que es puesto en operación.

Tiempo para Reparar (TPR): Tiempo que transcurre desde el momento de la falla hasta que el equipo es puesto en operación después de su reparación.



$$Downtime = \sum_{i=1}^n TPR_i + \sum_{j=1}^m TM_j$$

n: número de valores del TEF de la muestra

w: número de valores del TC de la muestra

El análisis de la variable down-time es conocido como mantenibilidad [M(t)]. Cuantitativamente se define como la probabilidad de restaurar la condición operativa del equipo en un periodo o tiempo misión.

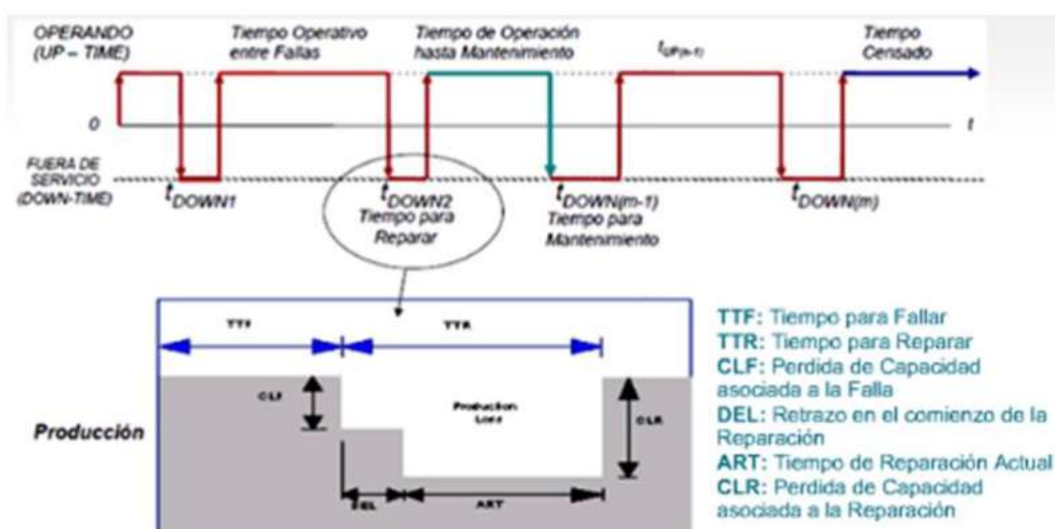
La figura clave de mérito para la mantenibilidad es a menudo el tiempo promedio para restaurar la condición operativa (TPPR).

Cuando el tiempo para reparar sigue la distribución exponencial, la mantenibilidad se expresa como:

$$M(t) = e^{-\mu \cdot t} = e^{-\frac{1}{TPPR} \cdot t}$$

$$\text{Donde } \mu = \text{Tasa de reparación} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n TPR_i}$$

n: número de valores del
TEF de la muestra



La estimación de confiabilidad de equipos implica el análisis de la variable aleatoria up-time y la estimación de los parámetros tasa de interrupciones o tasa de fallas y Tiempo Promedio Entre Eventos de Paro (TPEEP).

Por su parte, las estimaciones de disponibilidad implican, además del análisis de la variable aleatoria up-time y la estimación del parámetro tasa de interrupciones, el análisis de variable down-time y la estimación de la tasa de restauración y el Tiempo Promedio Para Restaurar (TPPR).

$$\text{Disponibilidad} = D(t) = \frac{\mu(t)}{\mu(t) + \lambda(t)}$$

Para equipos cuyos valores de up-time y down-time siguen o se ajustan a la distribución exponencial, puede decirse que las tasas de fallas es una constante:

$$\lambda(t) = \lambda.$$

También puede decirse que las tasas de reparaciones es una constante:

$$\mu(t) = \mu.$$

En este caso, las consecuencias de Confiabilidad y Disponibilidad se transforman en:

$$\text{Confiabilidad} = C(t) = e^{-\lambda t}$$

$$\text{Disponibilidad} = D(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} = \frac{TPEEP}{TPEEP + TPPR}$$

3. Confiabilidad en Activos Reparables.

Se define como activos no reparables aquellos cuya condición operativa no puede ser restaurada después de una falla, su vida termina con una “única” falla y deben ser reemplazados.

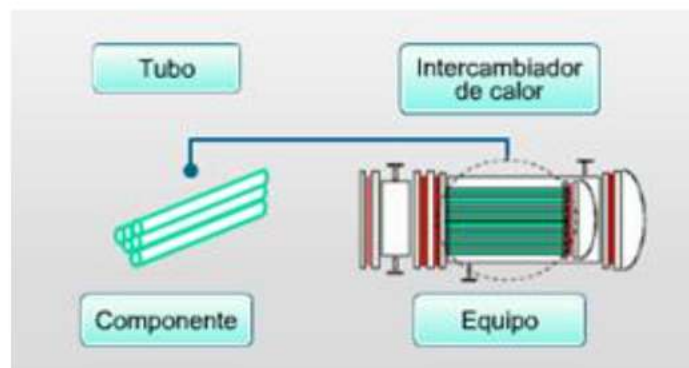
La mayoría de los componentes eléctricos suelen ser considerados “no reparables”. Las bombillas o bulbos de luz son los clásicos ejemplos de equipos no reparables. Sin embargo, es importante destacar que, en esencia, cualquier equipo es reparable, pero hay que tomar en cuenta si es costeable o no.

La política o estrategia de mantenimiento y/o reparación dice cómo debemos clasificar un equipo o componente. Si la política de mantenimiento es “reemplazar” después de la falla, se clasificara al activo como “no reparable”.

Si, por el contrario, la política es “reparar y reinstalar” después de la falla, clasificaremos al activo como “reparable”.

Adicionalmente, para clasificar activos, debe tenerse en cuenta el “volumen de control y contexto operacional específico” al cual se hace referencia.

Para entender estos conceptos analicemos esta figura.



Se define volumen de control en el nivel de componentes a los tubos de una intercambiador y se analiza la falla de un tubo, éstos son “reemplazados al fallar” y en la mayoría de las plantas de procesos poseen tubos de repuesto para este fin.

En este caso, el tubo es considerado un activo no reparable; no obstante, si el volumen de control se define como el intercambiador de calor completo, al fallar un tubo, no se reemplaza todo el intercambiador, solo el tubo.

El tubo sigue siendo un activo no reparable, pero el intercambiador es un activo reparable.

Existen otros aspectos de carácter estratégico, como el contexto operacional considerado, que contribuyen a catalogar para efectos prácticos, un componente o sistema, como reparable o no reparable.

3.1 Velocidad de incremento del peligro o tasa de fallas

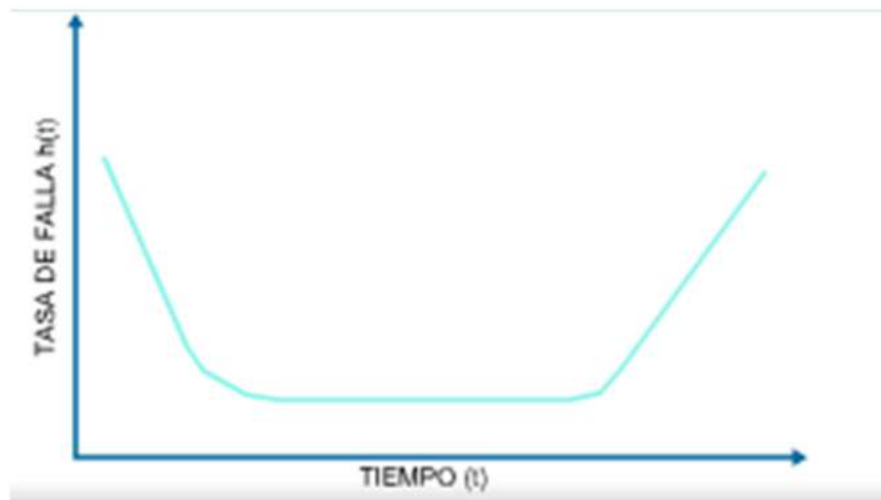
Para hacer pronósticos en equipos de componentes no reparables se utiliza la función de velocidad de incremento del peligro o tasa de fallas $h(t)$ que es un camino alternativo a la función confiabilidad $C(t)$, para describir el comportamiento de la variable aleatoria tiempo para la falla.

La función $h(t)$ describe el comportamiento de fallas de una gran cantidad de población por unidad de tiempo.

El análisis del comportamiento de fallas de una gran cantidad de poblaciones, de componentes o equipos observados durante largos periodos de estudio ha mostrado una función tasa de fallas decreciente en el primer periodo.

La primera etapa del periodo de observación (fenómeno conocido como mortalidad infantil), es seguido por una función tasa de fallas aproximadamente constante y, finalmente, por una función tasa de fallas creciente durante la última etapa del periodo de observación.

La siguiente figura muestra la forma que toma la función tasa de fallas para el comportamiento previamente descrito.



La forma de la función $h(t)$ mostrada en la figura anterior es ampliamente conocida como Curva de la bañera.

La **Curva de la bañera** es un gráfico que muestra el probable comportamiento de la tasa de fallas de un tipo de componente o equipo para diferentes instantes de tiempo; se construye observando y registrando el comportamiento histórico de fallas de una población de ese tipo de componente o equipo.

Una forma práctica de entender la curva de la bañera es analizar el caso de seres humanos.

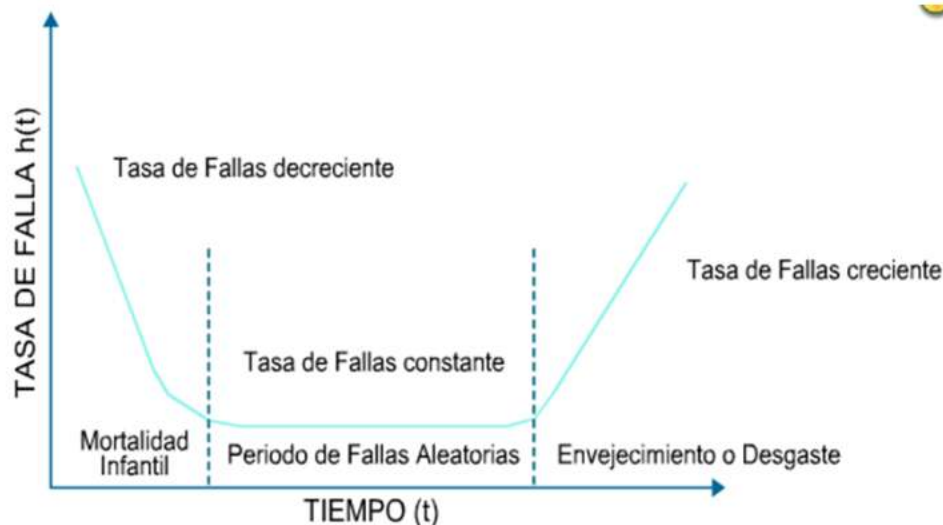
Supongamos que se analizan las vidas de 100 personas, nacidas en el año 1900, seleccionadas aleatoriamente. Con toda seguridad, si revisamos la fecha en que fallecieron, encontraremos que una buena parte de ellos murieron entre 0 y 3 años debido a problemas congénitos, problemas en el nacimiento o enfermedades infantiles severas; otros tantos, aunque un poco menos, entre 3 y 6 años, y menos aun entre 6 y 9 años.

Esto puede describirse como que el número de personas que murió por año fue decreciendo entre 0 y 9 años. A partir de allí encontraremos que la tasa de mortalidad se estabiliza: el número de personas que muere por año entre los 9 y 45 años permanece aproximadamente constante.

Finalmente, a partir de los 45 años encontraremos que el número de personas que muere por año es cada vez mayor, con un incremento lento entre los 45 y los 65 años y un incremento más severo a partir de los 65 años.

Si revisamos esta descripción, se entenderá que la misma coincide con el comportamiento de la Curva de la bañera.

Esta curva permite asegurar que el “peligro” de que una persona cualquiera muera entre 0 y 3 años es mayor que el peligro de que muera entre 3 y 6, y es menos incluso entre 6 y 9 años. También nos permite decir que el peligro de morir a los 20 años es aproximadamente igual que el peligro de morir a los 40 años y que en ambos casos es menor que el peligro de morir entre 0 y 6 años.

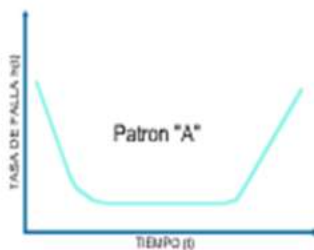
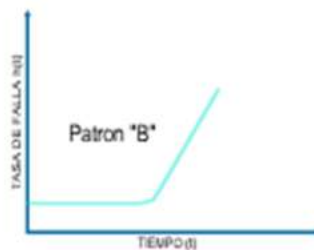
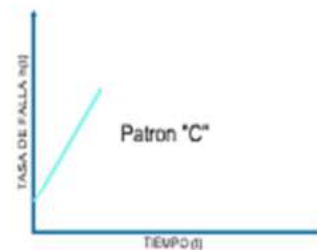
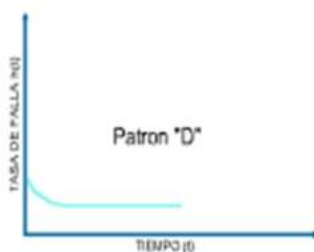
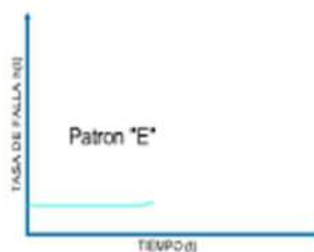
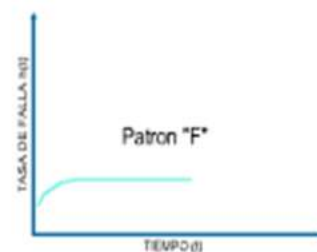


No obstante, el peligro de morir se incrementa a partir de los 45 años y va aumentando lentamente. A partir de los 65 años, el peligro de morir se hace mayor con más rapidez.

Esta curva no dice a qué edad va a morir un ser humano específico pero refleja como cambia el peligro de morir con la edad.

Es importante reconocer que esta curva se construyo observando en una población especifica de seres humanos y nos permite hacer predicciones sobre otros seres humanos.

La figura siguiente muestra otros patrones de fallas activos:



Este concepto es explotable a componente y equipos. Si se dispone de un número significativo de unidades de un mismo componente o equipo y se les pusiera a operar a partir de un tiempo inicial t_0 , se podría observar el comportamiento en el número de fallas por unidad de tiempo y construir su particular Curva de la bañera.

Típicamente una población de componentes o equipos, en general, presenta una tasa de falla alta en el primer periodo de vida que decrece hasta que alcanza un nivel constante por un periodo (etapa aleatoria); finalmente, por efecto del envejecimiento característico o desgaste de los componentes, comienza a aumentar (nuevamente el desgaste), como en el caso de los seres humanos reflejado en la figura anterior.

No obstante, es necesario mencionar que el patrón de fallas mostrado en la figura no se corresponde exactamente con el comportamiento de una amplia variedad de sistemas eléctricos, electrónicos y mecánicos.

Estudios realizados han mostrado que 4% de los sistemas se corresponden con el patrón "A", 2% con el patrón "B", 5% con el patrón "C", 7% con el patrón "D", 14 % con el patrón "E" y aproximadamente el 68% con el patrón "F".

3.2 La función Confiabilidad.

La confiabilidad de un activo no reparable, evaluada en un tiempo misión (t_m), es la probabilidad de que la variable aleatoria "tiempo para la falla" sea igual o mayor al periodo de análisis o tiempo misión (t_m).

En otras palabras, es la probabilidad de que el activo opere sin fallas un tiempo igual o superior al periodo de análisis o tiempo misión (t_m).

$$C(t_m) = Pr(t \geq t_m) = \int_{t_m}^{\infty} f(t) dt$$

$$C(t_m) = 1 - Pr(t \leq t_m) = 1 - \int_{-\infty}^{t_m} f(t) dt = 1 - F(t_m)$$

3.3 Reparable contra no reparable

Un elemento no reparable es aquél cuya operativa no puede ser restaurada después de una falla.

Un elemento no reparable:

- Su vida termina con una “única” falla y debe ser reemplazado.
- Para caracterizarlo probabilísticamente se requiere estimar la “tasa de fallas $h(t)$ ”.
- El termino probabilístico más importante es “confiabilidad $C(t)$ ”.

Un elemento reparable:

- En su vida puede ocurrir más de una falla.
- Para caracterizarlo probabilísticamente se requiere estimar la “tasa de ocurrencia” o “tasa de fallas” y la “tasa de reparación”.
- Los términos probabilísticos más importantes son “numero esperado de fallas $L(t)$ ” y “disponibilidad $D(t)$ ”.
- La disponibilidad es la probabilidad de que el elemento esté disponible (es decir, que no esté en reparación) a un tiempo “ t ”.
- Para calcular disponibilidad se requiere analizar estadísticamente los tiempos para la falla y los tiempos en reparación.

4 Pronostico en equipos reparables.

Un sistema reparable, como se infiere, acepta reparaciones y sus funciones pueden ser restauradas con el uso de cualquier método de reparación diferente al reemplazo del sistema completo.

En el análisis de sistemas reparables hay cinco posibles estados y así pueden quedar después de una reparación. Estos estados son:

1. Tan bueno como nuevo.
2. Tan malo como antes de reparar.
3. Mejor que antes de reparar pero peor que cuando estaba nuevo.
4. Mejor que cuando estaba nuevo.
5. Peor que antes de reparar.

Los modelos probabilísticos utilizados tradicionalmente para estimar o predecir el número esperado de fallas asumen alguno de los dos primeros estados pero no cubren los últimos tres, los cuales parecieran acercarse más a la realidad.

4.1 Variables probabilísticas de interés en el Análisis de Confiabilidad de activos reparables

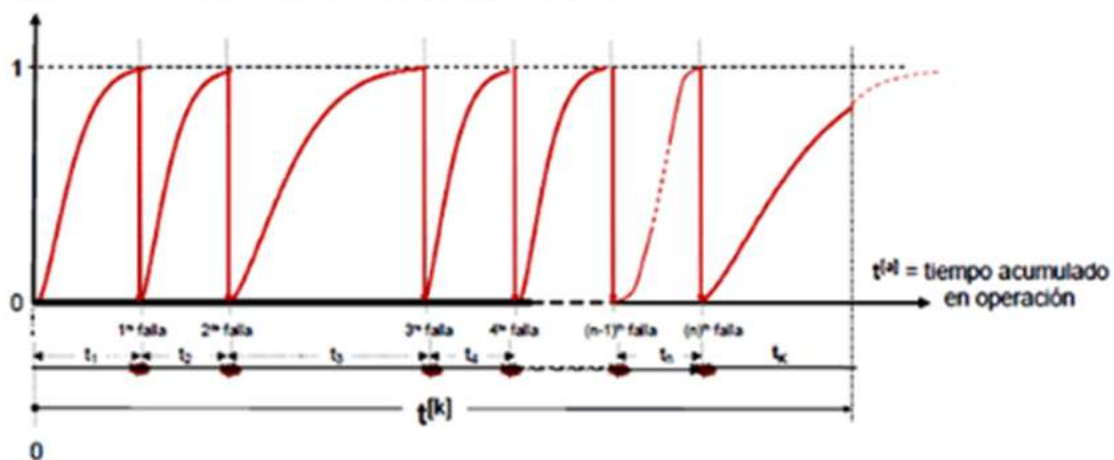
Un equipo reparable es aquel cuya condición operativa puede restaurarse, después de fallar, con una reparación. Esta consideración implica que en su vida puede ocurrir más de una falla y esta es la diferencia fundamental con los equipos “no reparables”, en cuya vida solo puede ocurrir una “única” falla.

Cuando se trata de equipos reparables y se habla de tiempo para la falla, surge inmediatamente la pregunta: ¿Cuál es el tiempo para cuál falla? (¿Cuál es el tiempo para la primera falla?, ¿Cuál es el tiempo para la segunda falla? O ¿Cuál es el tiempo para la enésima falla?), ya que para un tiempo misión (t_m) puede ocurrir más de una falla.

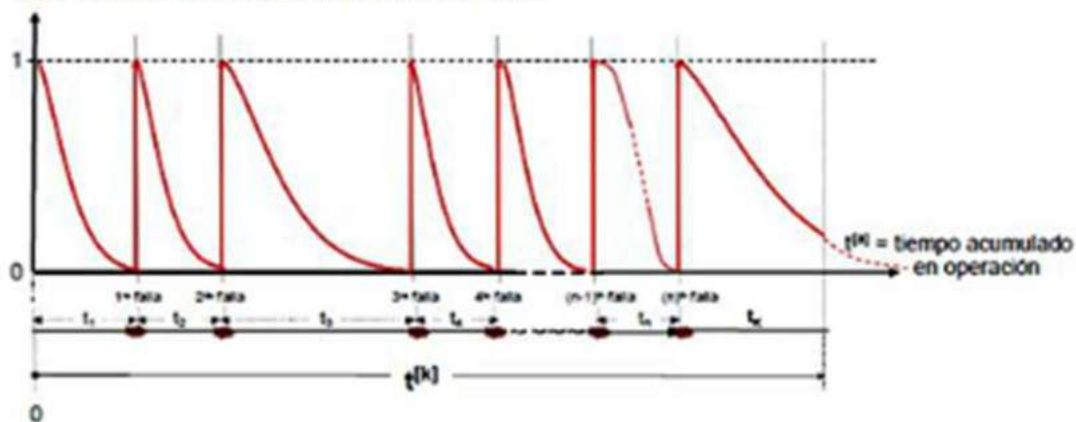
Si se habla, por ejemplo, de la probabilidad de falla en el tiempo misión (t_m), surgen estas preguntas: ¿Cuál es la probabilidad de cuantas fallas?, cual es la probabilidad de una falla en un periodo t_m ?, ¿Cuál es la probabilidad de dos fallas en un tiempo t_m ? O ¿Cuál es la probabilidad de n fallas en un tiempo t_m ?

En la siguiente figura se representa la probabilidad de fallas $F(t_i)$, que como puede notarse aumenta desde 0 a 1 entre la falla $i-1$ y la falla i ; para $i = 1, 2, 3, \dots, n$ y en la figura posterior se representa la confiabilidad del sistema $C(t_i)$, que disminuye desde 1 hasta 0 entre la falla $i-1$ y la falla i ; para $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

$F(t_i)$ = Probabilidad de Fallas entre la $(i-1)^{\text{ta}}$ falla y la i^{ta} falla



$C(t_i)$ = Confiabilidad entre la $(i-1)^{\text{ta}}$ falla y la i^{ta} falla



5 Confiabilidad basada en datos genéricos.

En caso de ausencia de una muestra representativa para el cálculo de la confiabilidad de activos, se emplea el método de Confiabilidad basada en datos genéricos, la cual se sustenta en las fuentes de siguientes:

1. Evidencia
2. Opinión de expertos
3. Información genérica
4. Teorema de Bayes



5.1 Evidencia

La evidencia está constituida por tiempos para fallar y para reparar, observados en equipos o poblaciones de equipos en una planta bajo análisis.

También puede considerarse como evidencia los tiempos para fallar y para reparar en equipos similares operando en plantas o procesos productivos similares.

La fortaleza de este tipo de información en su capacidad para representar la “realidad” y su debilidad es que probablemente “sean muy pocos datos” (información estadísticamente poco robusta).

Al considerar una población de equipos de la cual se ha recolectado una muestra de “n” son los tiempos de operación entre fallas de los equipos (TPF1, TPF2, TPFn), “w” son tiempos de operación de los equipos desde la última falla (tC1, tC2,... tCk) y T es el tiempo total de operación o up-time de la población de equipos.

$$T = \sum_{i=1}^n TEF_i + \sum_{k=1}^w TC_k$$

TEF_i: Tiempo que transcurre el equipo operando entre la falla (i-1) y la falla (i)

TC_k: Tiempo de operación desde la última falla

n: número de fallas

w: número de valores TC_k de la muestra

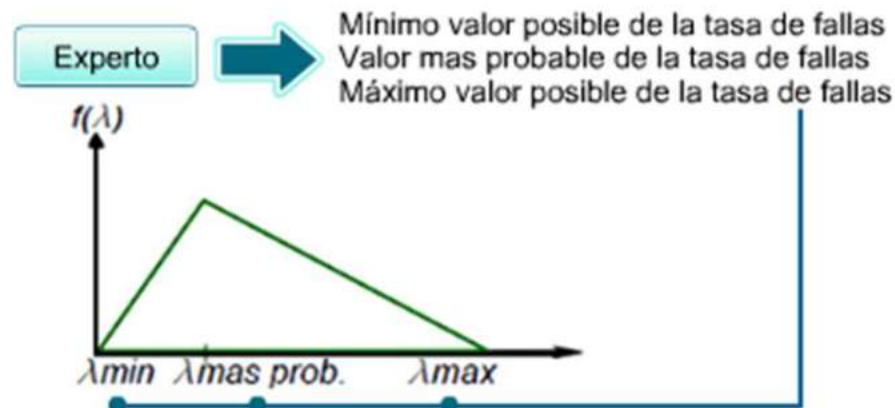
5.2 Opinión de Expertos.

La opinión de expertos representa una de las fuentes fundamentales de información para el cálculo de Confiabilidad y Disponibilidad.

Los expertos poseen valiosísima información sobre parámetros, como las tasas de falla y las tasas de reparación, normalmente sustentada en la observación y experiencia con equipos similares en operación (equipos similares al equipo al que le queremos estimar la tasa de fallas).

Una de las formas más efectivas de ejecutar la opinión de un experto es pedirle tres valores para caracterizar la información de interés: un valor mínimo, un valor probable y un valor máximo.

Con estos tres valores, apoyándose en distribuciones de probabilidad como la triangular o la betapert, es posible caracterizar probabilísticamente la opinión del experto.



5.3 Bases de Datos Genéricas.

Existe una gran cantidad de bases de datos genéricas que contienen tasas de fallas y tiempos de reparación, para diferentes tipos de equipos. Algunos de los más famosos bancos de este tipo de información son:

1. Off Shore Reliability Data (OREDA)
2. Pipeline and Riser Loss of Containment Database (PARLOC)
3. Electronic Parts Reliability Data (EPRD)
4. Non-electronic Parts Reliability Data (NPRD)
5. MIL-STD-217
6. Reliability Prediction Procedure for Electronic Equipment (Bellcore), TR-332
7. Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment, NSWC Standard 94/L07
8. IEEE Std 493-1997 Gold Book
9. Reliability of well Completion Equipment Database- WELL MASTER

Debido a la heterogeneidad de las muestras analizadas para construir estos bancos de información, la presentan en forma de distribuciones de probabilidad de las tasas de falla y reparación. Las más importantes son:

- **Oreda:** La publicación de esta organización es preparada por SINTEF (Industrial Management on The Behalf of The OREDA Project) y vendida por DNV. Las más recientes versiones publicadas son el OREDA 2002 y 2006.
- **IEEE:** El IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.) y sus predecesores, la AIEE (American Institute of Electrical Engineers) y el IRE (Institute of Radio Engineers) disponen de una amplia base de datos genérica de distribuciones de modos de fallas a tiempo entre fallas de equipos eléctricos, electrónicos y de instrumentación, al igual que un centenar de publicaciones útiles para estudios de confiabilidad.

- **Wellmaster:** Este estudio o proyectos ya va por una quinta fase desde diciembre del 2002, realizado por las diez principales industrias petroleras. El objetivo principal de esta fase es continuar con el énfasis del detalle en la data colectada para mejorar la confiabilidad de los equipos y los Análisis de Causa Raíz.
- **Parloc:** Esta publicación provee los riesgos cuantitativos basados en el contenido de una base de datos de tuberías en la industria de gas y petróleo, la cual detalla la mayoría de las tuberías instaladas en el Mar del Norte y también provee una base de datos de incidentes reportados por cada tubería afectada.



5.4 Teorema de Bayes.

El Teorema de Bayes es el vehículo estadístico que nos permite combinar la información de las tasas de fallas. Ésta puede provenir de las bases de datos genéricos o de la opinión de expertos con evidencia de tiempos de falla y reparación colectados en nuestra propia instalación o proceso.

La finalidad es obtener mejores estimados de las tasas de falla para reparar los equipos y los sistemas bajo análisis.

Este procedimiento es adecuado para estimar la mencionada tasa de fallas, en casos donde la evidencia o muestra es nula o no es representativa. El teorema permite hallar la distribución posterior o actualizada de la tasa de fallas.

Evidencia Muestral: Tiempos para la falla y tiempos de reparación colectados en la planta bajo análisis o en equipos operando en plantas o procesos productivos similares. La fortaleza de esta información en su representatividad de la “realidad” y su debilidad es que probablemente “sean muy pocos datos” (información estadísticamente poco robusta).

La evidencia propia y la información genérica se combinan para obtener una información mejorada o conocimiento actualizado. Esta información de conocimiento actualizado es una distribución modificada de las tasas de fallas, de la cual tomaremos la media o valor esperado o valor esperado como valor representativo.

Este estimado es más robusto que el conocimiento previo o la experiencia tomados por separado y de manera excluyente.

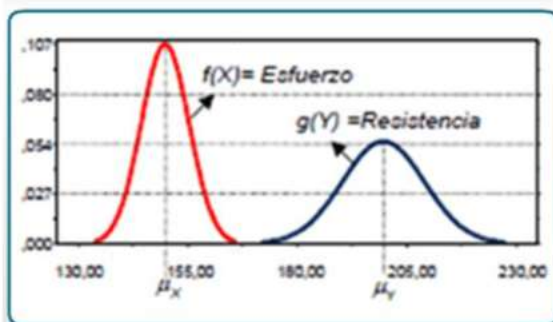
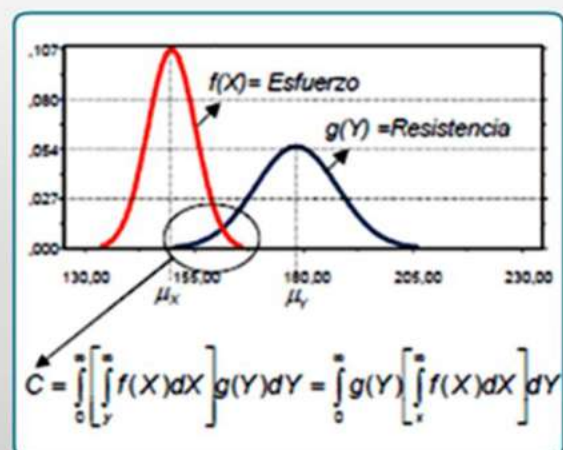
6. Confiabilidad basada en la física del deterioro.

Enfoque que sostiene que una falla es la última fase de un proceso de deterioro. Se concentra en predecir su ocurrencia por medio del entendimiento de “cómo ocurre la falla”. Es decir, estudiando la “física de la falla”.

Permite la estimación de la confiabilidad y la probabilidad de falla de un elemento y del riesgo total asociado al mismo, y está basada en la condición del equipo. Ideal para elementos cuyo historial de falla es escaso o inexistente, como los equipos estáticos.

Se sustenta en la teoría de “interferencia esfuerzo-resistencia”, donde:

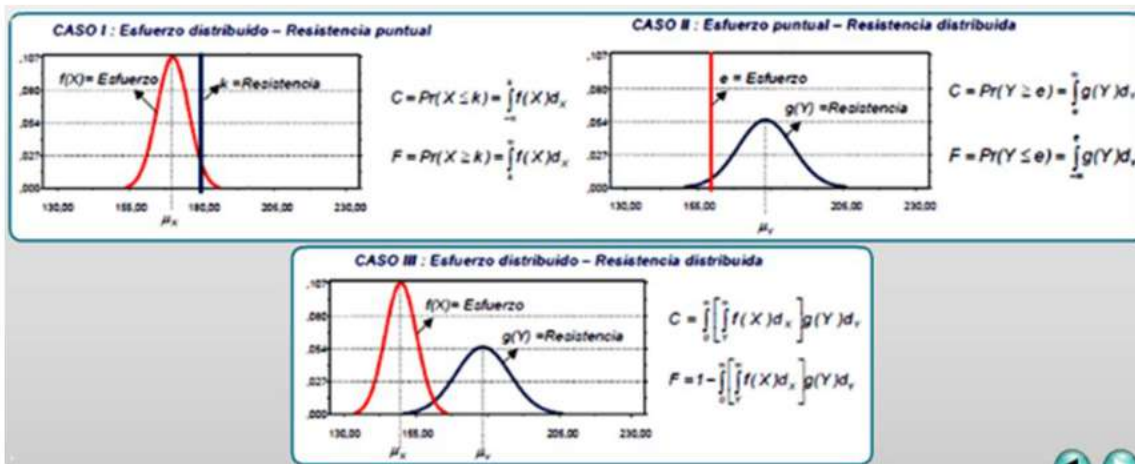
- Esfuerzo es la condición monitoreada.
- Resistencia es el límite permisible de la condición.



En este caso, para la física del deterioro, la Confiabilidad se define como la probabilidad de que el esfuerzo no supere la resistencia o limite permisible:

$$C = \Pr(Y > X) = \Pr(x < Y)$$

Enseguida se ven casos de interferencia Esfuerzo-Resistencia y sus “Ecuaciones Básicas”:



6.1 Descripción del análisis Carga-Resistencia

El análisis Carga-Resistencia tiene como premisa que las fallas son el resultado de una situación donde la carga aplicada produce un esfuerzo sobre el equipo o componente que excede su resistencia. En otras palabras, para que un equipo o componente sea confiable debe cumplirse la condición **Esfuerzo < Resistencia**.

Esfuerzo y Resistencia son usados en el sentido más amplio de la palabra. Si se analiza, por ejemplo, un recipiente a presión que se deteriora poco a poco por corrosión.

En un primer nivel de análisis puede decidirse que la tensión interna SX , que soporta la pared del recipiente como consecuencia de la presión, es el esfuerzo, y este se compara con una resistencia o máximo esfuerzo permisible S_{MAX} que debe obtenerse por ecuaciones de mecánica de la fractura y que seguramente depende del límite de fluencia y del espesor de pared del recipiente.

En otro nivel de análisis podemos decir, de forma equivalente al interior, que la presión interna PX del recipiente es el esfuerzo y lo comparamos contra la máxima presión permisible P_{MAX} , obtenida también por ecuaciones de mecánica de la fractura y que seguramente, depende del espesor de pared del recipiente y del límite de fluencia del material.

En un nivel básico, puede decirse que compararemos el espesor de pared remanente EX contra el mínimo espesor permisible E_{MIN} obtenido de ecuaciones de mecánica de la fractura; en este caso, los llamaremos esfuerzo a EX y resistencia a E_{MIN} .

Finalmente, sabemos que el espesor remanente depende de la pérdida de espesor y podemos comparar la pérdida de espesor dX contra la máxima pérdida permisible d_{MAX} , teniendo entonces dX como esfuerzo y a d_{MAX} como Resistencia.

Todos son análisis equivalentes y en todos los casos existirá un valor actual de una variable que se mide continuamente (monitoreo), el cual representara el esfuerzo y una valor limite de variable que representara a la resistencia. Ésta última normalmente está regulada por leyes físicas y estándares de la Ingeniería.

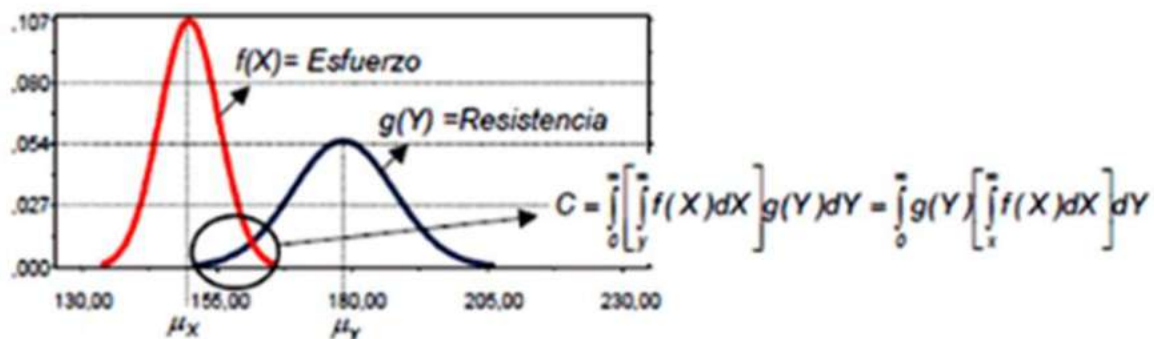
Un análisis similar se hace para cualquier otro mecanismo de falla o proceso de deterioro. Contario a la creencia general, en la mayoría de los casos, ni el esfuerzo ni la resistencia son valores fijos o determinísticos; por el contrario, sus valores son estadísticamente distribuidos.

Cada distribución tiene su valor media o valor esperado, denotado por μ_X para la carga y μ_Y para la resistencia y sus desviaciones estándar σ_X y σ_Y respectivamente.

En los procesos de deterioro, estas distribuciones se van acercando con el tiempo hasta llegar a solaparse. En este sentido, el solapamiento puede ocurrir por un deterioro paulatino de la resistencia o por un incremento del esfuerzo por razones diversas. En todo caso, para hacer un análisis de confiabilidad de este enfoque es muy importante estudiar los mecanismos que pueden producir este acercamiento y posterior solapamiento.

En el caso de los mecanismos, es muy importante determinar si el acercamiento se produce de manera paulatina en el tiempo o si se puede producirse súbitamente por una causa aleatoria.

La confiabilidad de un componente sometido a un esfuerzo es la probabilidad de que su resistencia exceda dicho esfuerzo y puede calcularse con la siguiente expresión.





Has concluido el tema:
**Confiabilidad basada en la física del
deterioro**, también has terminado la
sesión **Ingeniería de Confiabilidad**.

